

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representation of
The original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

THIS PAGE BLANK (USPTO)

EUROPEAN PATENT OFFICE

Patent Abstracts of Japan

PUBLICATION NUMBER : 2001330793
PUBLICATION DATE : 30-11-01

APPLICATION DATE : 24-05-00
APPLICATION NUMBER : 2000152609

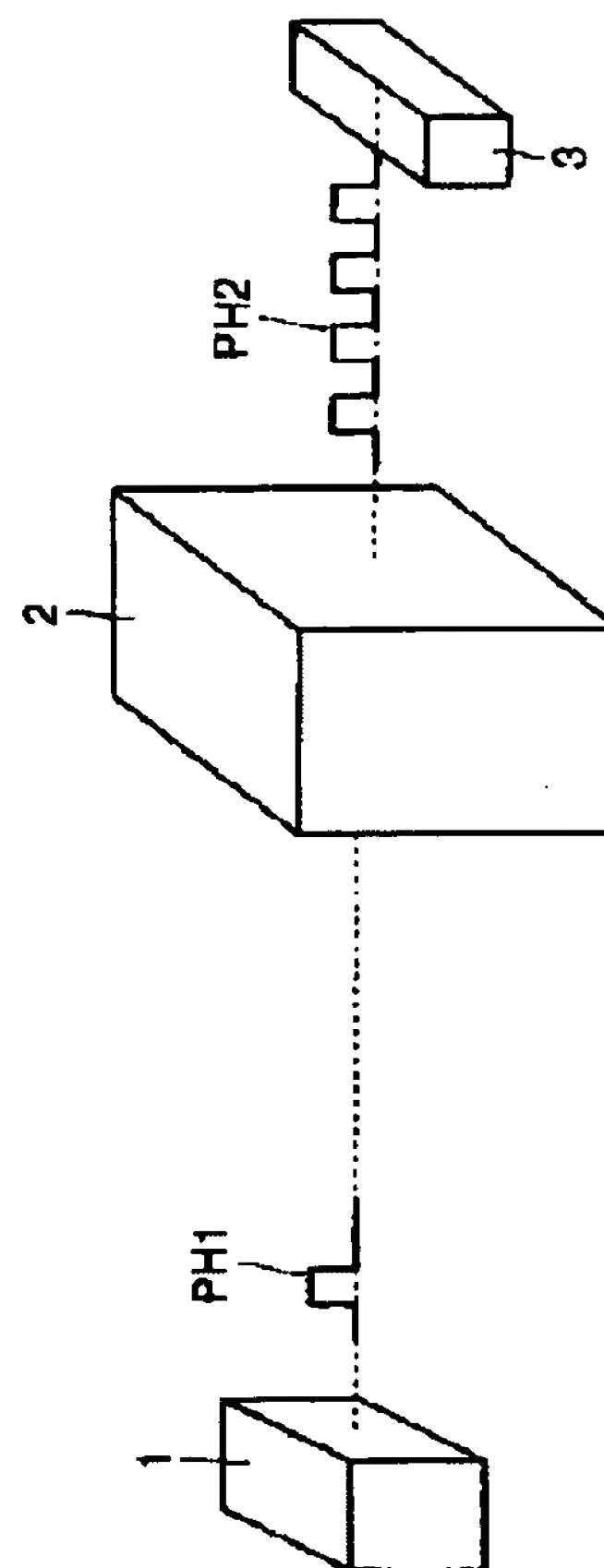
APPLICANT : KANSAI TLO KK;

INVENTOR : YAMAMOTO MUNETSUGU;

INT.CL. : G02B 27/00 G01J 11/00 G02B 1/02
G02B 6/12 G02B 26/06 H01S 3/10

TITLE : PULSE LIGHT FORMING DEVICE

10



ABSTRACT : PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a pulse light forming device capable of changing pulse widths.

SOLUTION: The pulse light forming device 10 has a light source 1 and a photonic crystalline body 2. The photonic crystalline body 2 consists of a face-centered cubic lattice structure two-dimensionally or three-dimensionally arrayed with rod-like GaAs at specified intervals and has photonic bands. Pulse light PH 1 having a single pulse component emitted from the light source 1 has an energy distribution on the upper bands of the photonic bands. The pulse light PH 1 made incident on the photonic crystalline body 2 propagates in the upper bands of the densely compacted photonic bands and give rise to phase differences between the components having respective energy values. Interference occurs between the components where the phase differences arise and the pulse light PH 2 having the pulse width of femto second order is emitted from the photonic crystalline body 2.

COPYRIGHT: (C)2001,JPO

THIS PAGE BLANK (USPTO)

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-330793

(P2001-330793A)

(43) 公開日 平成13年11月30日 (2001. 11. 30)

(51) Int.Cl.⁷

識別記号

F I

テーマト* (参考)

G 0 2 B 27/00

G 0 1 J 11/00

2 G 0 6 5

G 0 1 J 11/00

G 0 2 B 1/02

2 H 0 4 1

G 0 2 B 1/02

26/06

2 H 0 4 7

6/12

H 0 1 S 3/10

Z 5 F 0 7 2

26/06

G 0 2 B 27/00

Z

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 12 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号

特願2000-152609(P2000-152609)

(22) 出願日

平成12年 5 月24日 (2000. 5. 24)

特許法第30条第1項適用申請有り 1999年11月25日 I
EEE発行の「1999 IEEE Seventh In
ternational Conference on
Terahertz Electronics Pr
oceedings」に発表

(71) 出願人 396011680

株式会社エイ・ティ・アール環境適応通信
研究所

京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2

(71) 出願人 899000046

関西ティー・エル・オー株式会社

京都府京都市下京区中堂寺栗田町1番地

(72) 発明者 田中 智子

京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2

株式会社エイ・ティ・アール環境適応通信
研究所内

(74) 代理人 100064746

弁理士 深見 久郎 (外4名)

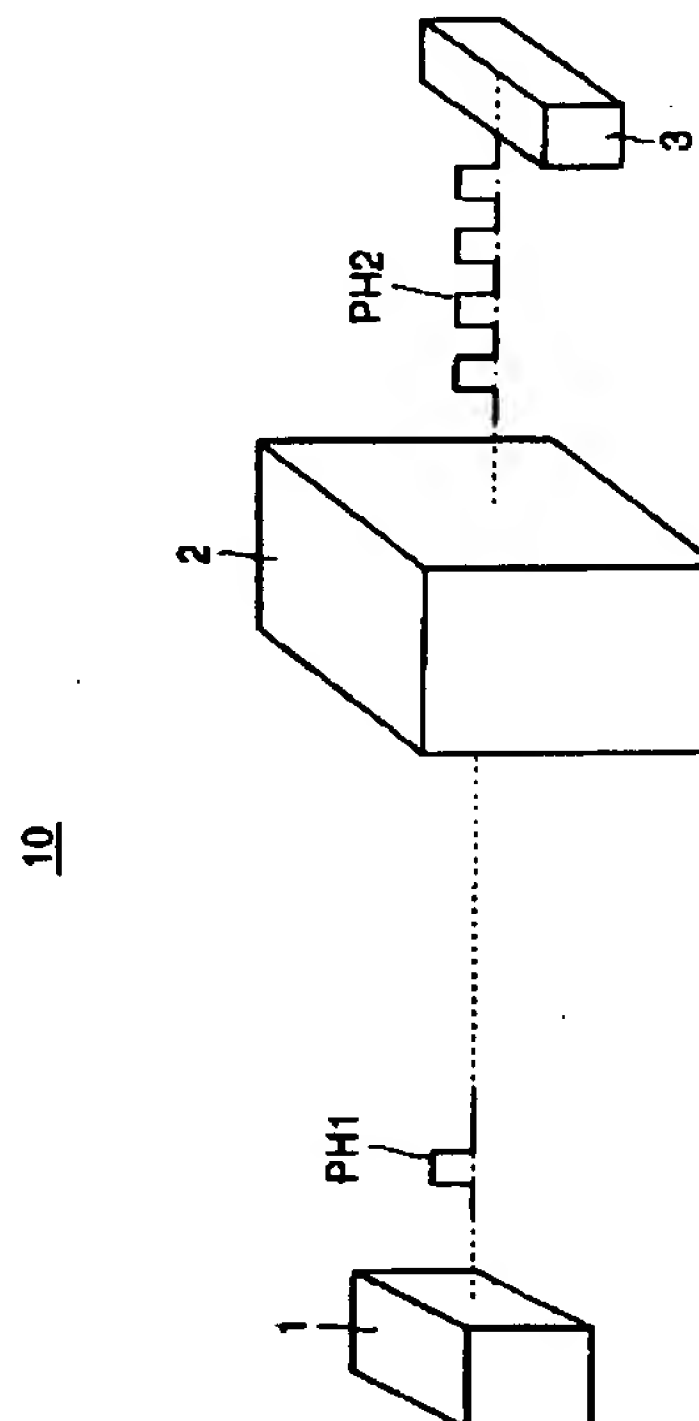
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 パルス光生成装置

(57) 【要約】

【課題】 パルス幅を変えられるパルス光生成装置を提供する。

【解決手段】 パルス光生成装置10は、光源1と、フォトニック結晶体2とを備える。フォトニック結晶体2は、棒状のGaAsを一定間隔で2次元もしくは3次元的に配列した面心立方格子構造から成り、フォトニックバンドを有する。光源1から出射された単一のパルス成分を有するパルス光PH1は、フォトニックバンドの上位バンドにエネルギー分布を有する。フォトニック結晶体2に入射したパルス光PH1は、密に詰まったフォトニックバンドの上位バンドを伝搬し、各エネルギー値を有する成分間に位相差が生じる。そして、位相差を生じた成分間で干渉が生じ、フォトニック結晶体2からフェムト秒オーダーのパルス幅を有するパルス光PH2が出射される。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 短パルス幅を有する単一のパルス成分から成る第1のパルス光を出射する光源と、
前記光源から出射された前記第1のパルス光を入射し、複数のパルス成分から成る第2のパルス光を出射するフォトニック結晶体とを含み、
前記第1のパルス光は、前記フォトニック結晶体のフォトニックバンドの上位バンドにエネルギー分布を有し、
前記第2のパルス光は、前記第1のパルス光の波長、もしくは前記第1のパルス光が前記フォトニック結晶体に入射する方向に基づいて決定されるパルス幅を有する、パルス光生成装置。

【請求項2】 前記フォトニック結晶体は、
第1の屈折率を有する第1の物質と、
前記第1の屈折率より大きい第2の屈折率を有する第2の物質とを2次元的もしくは3次元的に交互、且つ、周期的に配列して成る、請求項1に記載のパルス光生成装置

【請求項3】 前記第2の物質は棒状形状から成り、
前記フォトニック結晶体は、第1の方向に前記第1および第2の物質を交互、且つ、周期的に配列して成る第1の層と、
前記第1の方向と同一平面内における前記第1の方向に垂直な第2の方向に前記第1および第2の物質を交互、且つ、周期的に配列して成る第2の層とを前記第1および第2の方向に垂直な第3の方向に交互に積層して成り、
前記第1の層における前記棒状形状の長手方向は前記第2の方向であり、前記第2の層における前記棒状形状の長手方向は前記第1の方向である、請求項2に記載のパルス光生成装置。

【請求項4】 前記第1の物質は空気であり、
前記第2の物質はGaAsである、請求項3に記載のパルス光生成装置。

【請求項5】 前記フォトニック結晶体に対する前記第1のパルス光の入射方向を変更する変更手段をさらに含む、請求項1から請求項4のいずれか1項に記載のパルス光生成装置。

【請求項6】 前記変更手段は、前記フォトニック結晶体に含まれる基板に垂直な軸の回りに前記フォトニック結晶体を回転させる回転手段から成る、請求項5に記載のパルス光生成装置。

【請求項7】 前記変更手段は、前記フォトニック結晶体に含まれる基板に垂直な軸の回りに前記フォトニック結晶体を回転させる回転手段と、
前記基板に垂直、且つ、前記第1のパルス光の光軸に並行な平面内において前記フォトニック結晶体を中心にした円周に沿って前記光源を移動させる移動手段とから成る、請求項5に記載のパルス光生成装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、フォトニック結晶体を用いたパルス光生成装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】植物が光を用いて二酸化炭素と水により炭水化物を生成する光合成、および生体内での情報伝達等に関する化学反応は100フェムト秒(fs)程度の極めて速い速度で起こる。そして、かかる反応の機構を調べるためにフェムト秒の極短パルス光が用いられている。

【0003】フェムト秒オーダーの極短パルス光は、衝突モード同期(CPM: Colliding Pulse Mode-locking)リング色素レーザーやチタン・サファイア(Ti:Al₂O₃)レーザーによって発生させられる。衝突モード同期リング色素レーザーは、可飽和色素とレーザー色素とをリング共振器長Lの4分の1の位置に設置した構成から成る。そして、時間t=0において、互いに逆方向に進行する2つのパルスを可飽和色素に吸収させて可飽和色素中で衝突させる。その結果、可飽和色素中で飽和効果を増強された2つのパルスは、時間t=L/4c(c:光速)の後、順次、レーザー色素により増幅されて外部へ取り出される。衝突モード同期リング色素レーザーは、50~100fsのパルス光を安定して発生する。

【0004】また、モード同期のチタン・サファイア(Ti:Al₂O₃)レーザーは、サファイア(Al₂O₃)結晶中にドーパされたTi³⁺イオンの励起準位(²T₂)と基底準位(²E)間遷移によってレーザー発振が起こる。²T₂→²E遷移の吸収スペクトルは、波長490nmにピークを有し、およそ波長400~600nmの範囲の光を吸収するものである。また、²T₂→²E遷移の発光スペクトルは、波長760nmにピークを有し、波長600~1100nmの範囲の光を発光するものである。このレーザーは、励起準位でのエネルギー緩和時間(3.2μs)が共振器長往復時間(~ns)に比べて十分に長いことから、緩和発振が起り易い。そして、安定なフェムト秒パルス(~100fs)が定常的に得られる。また、波長600~1100nmの範囲の光を発光するため、波長可変性も有する。

【0005】衝突モード同期リング色素レーザーやサファイアレーザーからは、パルス幅が一定のパルス光が出射される。

【0006】また、衝突モード同期リング色素レーザーやサファイアレーザーによる極短パルス光を対象物に照射するために空气中または個体中を伝搬させると、パルス光が伝搬する媒質の群速度の分散に起因してパルス幅が変化してしまうという問題があるため、出射直後のパルス幅を有するパルス光を対象物に照射するために、レーザーからの光をグレーティングを用いて回折させ、群速度を補正した後に回折した2つのパルス光を合成して所望の

パルス幅を実現した後に対象物に照射することが行われている。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】しかし、パルス幅が数100フェムト秒の極短パルス光を用いて光合成や人体内の有機物の反応を解析するには、パルス幅を変化させられる方が便利であるが、従来の極短パルス光の発生方法ではパルス幅を自由に換えられないという問題があった。

【0008】また、従来の方法では、光源から出射された直後のパルス幅を再合成して対象物に照射するには、全長十数cmという大きな光学系が必要となり、不便であるという問題もあった。

【0009】そこで、本発明は、かかる問題を解決するためになされたものであり、その目的はパルス幅を変えられるパルス光生成装置を提供することにある。

【0010】また、本発明の別の目的は、小さい光学系により出射直後のパルス幅を変えずに対象物にパルス光を照射できるパルス光生成装置を提供することにある。

【0011】

【課題を解決するための手段】この発明によるパルス光生成装置は、短パルス幅を有する単一のパルス成分から成る第1のパルス光を出射する光源と、光源から出射された第1のパルス光を入射し、複数のパルス成分から成る第2のパルス光を出射するフォトニック結晶体とを含み、第1のパルス光は、フォトニック結晶体のフォトニックバンドの上位バンドにエネルギー分布を有し、第2のパルス光は、第1のパルス光の波長、もしくは第1のパルス光がフォトニック結晶体に入射する方向に基づいて決定されるパルス幅を有する。

【0012】光源から出射されたフェムト秒オーダーの短パルス幅を有する単一のパルス成分から成る第1のパルス光がフォトニック結晶体に入射すると、第1のパルス光はフォトニック結晶体の密に詰まった上位バンドにエネルギー分布を有するため、各エネルギーによって異なるフォトニックバンドを伝搬する。その結果、伝搬するフォトニックバンドによって光の伝搬速度が異なり、速度差が生じた光が相互に干渉するため、速度差に応じて決定されるパルス幅を有する複数のパルス成分から成る第2のパルス光がフォトニック結晶体から出射される。また、第1のパルス光の波長もしくはフォトニック結晶体への入射方向を変えることによっても、入射光は異なるフォトニックバンドを伝搬し、その伝搬速度差に応じて決定されるパルス幅を有する第2のパルス光がフォトニック結晶体から出射される。

【0013】従って、フォトニック結晶体に入射する第1のパルス光の波長もしくは入射方向を変えることによりパルス幅の異なるパルス光を発生させることができる。

【0014】好ましくは、パルス光生成装置を構成する

フォトニック結晶体は、第1の屈折率を有する第1の物質と、第1の屈折率より大きい第2の屈折率を有する第2の物質とを2次元的もしくは3次元的に交互、且つ、周期的に配列して成る。

【0015】屈折率の異なる2つの物質を2次元的もしくは3次元的に交互、且つ、周期的に配列してフォトニック結晶体が作製されるため、入射光は、その方向が変化してもフォトニックバンドを伝搬する。つまり、いずれの方向からフォトニック結晶体に入射しても、入射光はフォトニックバンドを伝搬する。

【0016】従って、光源とフォトニック結晶体との相対位置は限定されず、パルス光生成装置を容易に作製できる。

【0017】好ましくは、第2の物質は棒状形状から成り、フォトニック結晶体は、第1の方向に第1および第2の物質を交互、且つ、周期的に配列して成る第1の層と、第1の方向と同一平面内における第1の方向に垂直な第2の方向に第1および第2の物質を交互、且つ、周期的に配列して成る第2の層とを第1および第2の方向に垂直な第3の方向に交互に積層して成る。そして、第1の層における棒状形状の長手方向は第2の方向であり、第2の層における棒状形状の長手方向は第1の方向である。

【0018】棒状形状の第1および第2の物質を交互、且つ、周期的に配列して層を構成し、隣接する層間で棒状形状の長手方向が直交するように層を積層することによってフォトニック結晶体を作製する。

【0019】従って、簡単な形状の物質を用いてフォトニック結晶体を作製することができる。

【0020】特に、好ましくは、第1の物質は空気であり、第2の物質はGaAsである。隣接する層間において、棒状形状の長手方向が直交するように棒状形状のGaAsを周期的に配列してフォトニック結晶体が作製される。

【0021】従って、屈折率比が2.0以上のフォトニック結晶体を容易に作製できる。好ましくは、パルス光生成装置は、フォトニック結晶体に対する第1のパルス光の入射方向を変更する変更手段をさらに含む。

【0022】変更手段は、第1のパルス光のフォトニック結晶体への入射方向を変更する。その結果、フォトニック結晶体への入射方向に基づいて決定されるパルス幅を有する第2のパルス光がフォトニック結晶体から出射される。

【0023】従って、パルス幅の異なるパルス光を、適宜、発生させることができる。特に、好ましくは、変更手段は、フォトニック結晶体に含まれる基板に垂直な軸の回りにフォトニック結晶体を回転させる回転手段から成る。

【0024】フォトニック結晶体を回転させることによって第1のパルス光のフォトニック結晶体への入射方向

が変更する。その結果、フォトニック結晶体への入射方向に基づいて決定されるパルス幅を有する第2のパルス光がフォトニック結晶体から出射する。

【0025】従って、フォトニック結晶体を回転させることによって容易にパルス幅の異なるパルス光が発生される。

【0026】特に、好ましくは、変更手段は、フォトニック結晶体に含まれる基板に垂直な軸の回りにフォトニック結晶体を回転させる回転手段と、基板に垂直、且つ、第1のパルス光の光軸に並行な平面内においてフォトニック結晶体を中心にした円周に沿って光源を移動させる移動手段とから成る。

【0027】回転手段によってフォトニック結晶体を回転させ、移動手段によって光源をフォトニック結晶体の回りに移動させる。その結果、第1のパルス光のフォトニック結晶体に対する相対位置が変更され、第1のパルス光のフォトニック結晶体への入射方向が変わる。そして、入射方向に基づいて決定されるパルス幅を有する第2のパルス光がフォトニック結晶体から出射される。

【0028】従って、フォトニック結晶体の回転と、光源の移動とによってパルス幅の異なるパルス光を、容易に、発生させることができる。

【0029】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態について図面を参照しながら詳細に説明する。なお、図中同一または相当部分には同一符号を付してその説明は繰返さない。

【0030】[実施の形態1] 図1は、この発明によるパルス光生成装置の実施の形態1を示し、パルス光生成装置10は、光源1と、フォトニック結晶体2とを備える。光源1は、同期モード型チタン・サファイア($\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$)レーザからの $0.7\sim 1.0\mu\text{m}$ の波長を有する光をパラメトリック光発生装置により $1.2\sim 2.0\mu\text{m}$ の波長を有する光に増幅し、さらに差周波発生装置により $5.0\sim 8.0\mu\text{m}$ の波長を有する光に増幅して、パルス幅200フェムト秒(fs)の単一のパルス成分から成るパルス光PH1を出射する。パルス光PH1のエネルギーは $1\mu\text{J}$ である。

【0031】フォトニック結晶体2は、後述するようにパルス光PH1を入射し、パルス光PH1の波長もしくは入射方向に基づいて決定されるパルス幅を有する複数のパルス成分から成るパルス光PH2を出射する。光源1とフォトニック結晶体2との距離は、2mであり、究極的には光源1とフォトニック結晶体2とを接触させてパルス光生成装置10を作製しても良い。

【0032】従って、パルス光生成装置10は、単一のパルス成分から成るパルス光PH1を、その波長または入射方向に基づいて決定されるパルス幅を有する複数のパルス成分から成るパルス光PH2に変換して対象物3に照射するものである。

【0033】図2は、図1に示した光学素子10を構成するフォトニック結晶体2の構造を示したものであり、フォトニック結晶体1は、幅d1の棒状のGaAs20Xを基板22に垂直な方向DR1に間隔d2で配置し、幅d1の棒状のGaAs20Yを前記方向DR1に垂直な方向DR2に間隔d3で配置し、幅d1の棒状のGaAs20Zを前記方向DR1および前記方向DR2に垂直な方向DR3に間隔d3で配置した構造を有する。棒状のGaAs20X, 20Y, 20Zは、辺の長さがd1, d2の長方形の断面形状を有し、長手方向の長さはd4である。その結果、フォトニック結晶体1は、前記方向DR1に幅d1のGaAs20Xと幅d1の空気の領域21Xとを交互、且つ、周期的に配列し、前記方向DR2に幅d1のGaAs20Yと幅d3の空気の領域21Yとを交互、且つ、周期的に配列し、前記方向DR3に幅d1のGaAs20Zと幅d3の空気の領域21Zとを交互、且つ、周期的に配列した構造を有する。なお、フォトニック結晶体2に入射する光の波長が $5\sim 8\mu\text{m}$ の場合、d1は約 $1.2\mu\text{m}$ であり、d2は約 $1.2\mu\text{m}$ であり、d3は約 $2.8\mu\text{m}$ であり、d4は約 $100\mu\text{m}$ である。

【0034】また、本発明においては、 $d1=d2=d3$ であってもよい。すなわち、フォトニック結晶体2は、屈折率3.3のGaAsと屈折率1.0の空気の領域とが2次元的もしくは3次元的に交互、且つ、周期的に配列された構造を有する。そして、配列の周期は、前記DR1方向には $4d2$ であり、前記DR2およびDR3方向には $d1+d3$ である。そして、 $d1=d2=d3$ の場合、周期は前記DR1, DR2, DR3において $2d1$ である。

【0035】1つのGaAs20Xと、それに隣接する空気の領域21Xとでフォトニック結晶体2における1周期を構成するが、この1周期は、フォトニック結晶体2に入射する光の波長に基づいて決定される。従って、1周期が $d1+d3$ である場合、入射する光の波長は、 $5\sim 10\mu\text{m}$ である。

【0036】また、フォトニック結晶体2は、棒状のGaAsと空気の領域とを交互、且つ、周期的に配列して成る層を、それに隣接する層間において棒状のGaAsの長手方向が直交するように、基板13と垂直な方向DR1に積層した構造を有するものとして把握することもできる。そして、基板に垂直な方向DR1における積層数は $5\sim 8$ である。

【0037】フォトニック結晶体2においては、棒状のGaAsの長手方向が基板13に並行な1つの方向DR3を向いている2つの層14, 15間においてGaAsの配置位置が前記方向DR3に垂直な方向DR2に半周期ずれ、棒状のGaAsの長手方向が前記方向DR3に垂直な方向DR2を向いている2つの層16, 17間においてGaAsの配置位置が前記方向DR3に半周期ず

れている。すなわち、フォトニック結晶体2は、ダイヤモンド構造を有する。

【0038】図3を参照して、図2に示す構造を有するフォトニック結晶体2のフォトニックバンドについて説明する。横軸は k ベクトルであり、縦軸はエネルギー準位と考えられる。フォトニックバンドにおいては、エネルギー的に下位のバンド27と上位のバンド28とが存在し、下位のバンド27の最上位置と、上位のバンド28の最下位の位置との差がフォトニックバンドギャップ E_{phg} である。そして、フォトニックバンドギャップ E_{phg} の大きさは波数（横軸の k の値）によって異なる。フォトニック結晶体2は、屈折率3.3のGaAsと屈折率1.0の空気とで構成されるため、下位のバンド27と上位のバンド28との間に開きがあるが、フォトニックバンドにおいて下位のバンドと上位のバンドとの間に開きを生じさせるためには、2.0以上の屈折率比がある2つの物質でフォトニック結晶体2を構成することが必要である。また、図3に示すようなフォトニックバンドが現れるためには、図2に示したGaAsと空気の領域とを交互、且つ、周期的に配列した層を少なくとも5層以上積層することが必要である。

【0039】フォトニックバンドギャップ E_{phg} 内には準位は存在せず、フォトニックバンドギャップ E_{phg} のエネルギーに相当するエネルギーを有する光はフォトニック結晶体2を透過することができない。

【0040】フォトニック結晶体2は、図2に示すような周期構造を有する結果、フォトニック結晶体2に入射した光は屈折率の異なる2つの物質の界面で反射され、その反射光と入射光とが相互に干渉することにより屈折率の大きい物質中に光を局在化させる。つまり、フォトニック結晶体は、屈折率を周期的に変化させることにより、入射した光を屈折率の大きい物質中に局在化させ、光が伝搬する準位を形成するものである。その結果、図3に示すフォトニックバンドが構成される。

【0041】フォトニック結晶体では、フォトニックバンドギャップ E_{phg} より小さいエネルギーを有する光が入射しても、その光はフォトニック結晶体を透過しない。フォトニック結晶体においては、計算されたフォトニックバンドにおいて準位の存在するエネルギーに相当するエネルギーを有する光のみを透過する。すなわち、図3に示すフォトニックバンドは、入射した光がフォトニック結晶体を伝搬する光路のようなものである。この点が類似のバンド構造を有する結晶性半導体と異なる点である。

【0042】図3に示すようなフォトニックバンドを有するフォトニック結晶体2においては、フェムト秒オーダーの極短パルス幅を有する1つのパルス成分から成るパルス光PH1を、複数のパルス成分から成るパルス光PH2に変換することが期待される。そこで、透過方向に対するミューアの吸収境界条件および伝搬方向に対す

る周期境界条件を設定した3次元FDTD (Finite Difference Time Domain) 法により3次元フォトニック結晶体における極短パルス光の透過の振る舞いを解析した。中心周波数 f 、パルス幅 $200fs$ のガウシアン分布を有するパルス光が3次元フォトニック結晶体を透過すると仮定し、中心周波数 f を、 $\langle \Gamma-X' \rangle$ 方向におけるフォトニックバンドギャップより下の準位からフォトニックバンドギャップの上の準位まで変化させた。また、入射光はフォトニック結晶体を構成する物質と何ら干渉しないと仮定した。その結果、図4に示すような計算結果が得られた。図4において、横軸は時間を示し、縦軸はパルス光の強度を示す。フォトニックバンドギャップより上の周波数を有するパルス光の形状は、その周波数に依存して劇的に変化する。これは、フォトニックバンドギャップより上のバンドの分散関係が非常にユニークであり、図3に示すように複雑であるからである。一方、フォトニックバンドギャップより長い波長を有するパルス光は、フォトニック結晶体を透過した後、その形状は殆ど変化しない。これは、低いバンドの群速度の分散関係は単純であり、電磁波の透過に対して殆ど影響しないためである。

【0043】周波数 $f=0.8$ のパルス光に対しては、テラ (T) Hzの周波数を有するパルス列が観測され得る。パルス列のフーリエ成分は、数学的にテラ (T) Hzの周期を有するスペクトルの変調として表現可能である。このことは、結晶における多重反射の結果でもなく、結晶の全ての層からの反射の結果によるものでもない。これは、周波数0.8のパルス光だけに観測されることである。

【0044】そこで、上記の理論予測に基づいて、中赤外周波数領域での3次元フォトニック結晶体における極短パルス光の透過について実験を行った。光源は、モード同期型のチタン・サファイアレーザにより発生した光を再生増幅パラメトリック増幅差周波発生により得られたフェムト秒パルス光である。

【0045】実験に用いた光学系を図5に示す。出射されたパルス光は、ZnSeビームスプリッタ32により2つのビームに分割され、1つのビームは周波数 f_1 のチョッパ35でチョップされた後、反射ミラー36、37を介してフォトニック結晶体38を通過する。そして、もう1つのビームは、周波数 f_0 のチョッパ33でチョップされた後、反射ミラー34を介してMach-Zehnder干渉計39に入射し、この干渉計39によりフォトニック結晶体38を通過した光と合成される。合成された2つのビームは、HgCdTe検出器40で検出される。反射ミラー36、37は、チョッパ35を通過したビームがフォトニック結晶体37に入射するようにコンピュータ42によりその角度が制御され、チョッパ33、35はロックインアンプ41により同期がとられている。

【0046】図6は、図5に示す光学系を用いた実験結果を示しており、図6においては、縦軸がパルス光の強度、横軸が遅延時間であり、曲線k1が実験結果、曲線k2が計算結果である。定性的には実験結果は計算結果と良い一致を示す。 $\Gamma-X'$ 方向における上位のバンド端のバンド構造は平坦であり、そのような領域においては、電磁波の速度、つまり、群速度は非常に小さく、ダイナミックに変化する。極短パルス光は、非常に広いスペクトル（中心周波数0.8に対して周波数の変動幅が0.08）を持つので、上位のバンド端（周波数0.8に相当）に適合する周波数を有するパルスは、いくつかの上位バンドを活性化する。その結果、周波数0.8の極短パルスは結晶中のいくつかのモードに沿って透過し、モード間の干渉によって出力パルスは発振的な振る舞いを示す。そして、出力パルスは、約300fsのパルス幅を有する。一方、周波数0.94のパルスはフォトニック結晶中の1つのバンドだけを活性化するため、フォトニック結晶を通過した後の光は発振的な振る舞いを示さない。

【0047】すなわち、図2に示す結晶構造において、基板22に垂直な方向DR1から光が入射すると、図3に示すフォトニックバンドにおいて、 $\Gamma-X'$ 領域30のバンドに光が入射する。そして、光源1から出射されるパルス幅200fsのパルス光PH1は、分布幅0.08の周波数0.8を有するので、領域29で示される広いエネルギー分布を有する。つまり、パルス光PH1はフォトニックバンドの上位のバンドにエネルギー分布を有する。その結果、パルス光PH1の各エネルギー値を持った成分は、 $\Gamma-X'$ 領域30に存在する複数のバンド31のうち、エネルギー準位的に適合したバンドを活性化し、その活性化したバンドに沿ってフォトニック結晶2を伝搬する。

【0048】その結果、エネルギー的に高い準位に存在するバンドを伝搬する光は速く伝搬し、エネルギー的に低い準位に存在するバンドを伝搬する光は遅く伝搬するため、位相差を有する複数の光が生成され、その位相差を有する複数の光が相互に干渉する結果、複数のパルス成分から成るパルス光PH2がフォトニック結晶2から出射される。そして、パルス光PH2のパルス幅は、エネルギー分布を有する入射光PH1の各成分がどの程度の位相差を有する光として相互に干渉するか、つまり、フォトニックバンドのうち、どのバンドに沿ってフォトニック結晶2を伝搬するかによって決定される。そして、位相差が大きい場合はパルス幅の広いパルス光PH2がフォトニック結晶2から出射され、位相差が小さい場合はパルス幅の狭いパルス光PH2がフォトニック結晶2から出射される。

【0049】従って、パルス光生成装置10は、200fsの極短パルス幅を有する単一のパルス成分から成るパルス光PH1をフォトニック結晶2の $\Gamma-X'$ 方向

から入射させることにより約300fsのパルス幅を有する複数のパルス成分から成るパルス光PH2に変換することができる。また、フォトニック結晶2の寸法は非常に小さいので、小さい光学系により所望のパルス幅を有するパルス光を発生させることができる。

【0050】[フォトニック結晶の作製] 図7および図8を参照して、フォトニック結晶2の作製方法について説明する。GaAsウェハから成る基板22上にGaAs43を結晶成長させる（図7の(a)参照）。この場合、GaAs43の膜厚はフォトニック結晶2の基板22に垂直な方向DR1におけるGaAs20X、20Y、20Zの長さd2に相当する膜厚であり、結晶成長の方法は、液相成長法（LPE: Liquid Phase Epitaxy）、分子線結晶成長法（MBE: Molecular Beam Epitaxy）等の一般的な方法である。GaAsを結晶成長させた後、電子ビームEBを矢印44の方向にスキャンさせて膜状のGaAsを間隔d3でカッティングし（図7の(b)参照）、幅d1、および長手方向の長さd4を有する棒状のGaAs45、45、45、...を基板22上に作製する（図7の(c)参照）。棒状のGaAs45、45、45、...を基板22上に作製したものを2個作り、棒状のGaAs45、45、45、...の長手方向が直交するように棒状のGaAs45、45、45、...同士を重ねる（図8の(d)参照）。この場合、棒状のGaAs45、45、45、...の表面は洗浄されており、未結合手が存在するため、棒状のGaAs45、45、45、...と棒状のGaAs45、45、45、...とを接触させるだけGaAs同士は結合する。その後、上側の基板を半導体プロセスにおけるウエットエッチングにより取除く（図8の(e)参照）。

【0051】図7の(a)～図8の(e)までの工程を繰り返すことによって、図2に示すように棒状のGaAsと空気とから成る層を基板22に垂直な方向DR1に積層したフォトニック結晶2が作製される。

【0052】図9を参照して、棒状のGaAsの各層における配置について説明する。基板22上に第1層23の棒状のGaAsが形成され、その上に第2層24の棒状のGaAsが第1層23の棒状のGaAsと直交するように形成される。そして、第3層25の棒状のGaAsは、第1層23の棒状のGaAsと同じ方向に配置されるが、第3層25の棒状のGaAsの配置位置は、第1層23の棒状のGaAsの配置位置から半周期ずれた位置である。第4層26の棒状のGaAsは第2層24の棒状のGaAsと同じ方向に配置されるが、第4層26の棒状のGaAsの配置位置は、第2層24の棒状のGaAsの配置位置から半周期ずれた位置である。すなわち、フォトニック結晶2は、棒状のGaAsを面心立方格子になるように配置することによって作製され

る。従って、フォトニック結晶体2の作製においては、第1層23と第3層25との位置合わせ、および第2層24と第4層26との位置合わせが重要である。この位置合わせは、第3層25の棒状のGaAsを第2層24上に載せた後、レーザ光を照射して観測される回折スポットのうち、±1次光の回折光強度が最小になるように行う。これにより面心立方格子構造のフォトニック結晶体2を正確に作製できる。

【0053】[パルス光生成装置の応用例] 図1に示すパルス光生成装置10を用いると、単一のパルス成分から成るパルス光から300fs程度のパルス幅を有するパルス光を発生させることができるが、このパルス光を図10に示す2つの準位間を移動して生成物が得られる反応系に照射すると、新しい生成物を生成できることができる。すなわち、下位の準位46から上位の準位47へ励起されて再び下位の準位46へ遷移することにより反応が進行する反応系においては、通常は、下位の準位46のエネルギー状態Aから光により上位の準位47のエネルギー状態Bに励起され、上位の準位47においてエネルギー状態Eに移行した後に下位のエネルギー状態Fに遷移することにより反応が進行する。

【0054】この反応系にパルス光生成装置10により生成されたパルス光PH2を照射すると、最初のパルス成分により下位の準位46のエネルギー状態Aから上位の準位47のエネルギー状態Bに励起され、エネルギー状態Bからの遷移時間が約300fsに相当するエネルギー状態Cに到達した時点で2つ目のパルス成分を照射すると、照射されたパルス光はエネルギー状態Cとエネルギー状態Dとのエネルギー差に相当するエネルギーを有するため上位の準位47のエネルギー状態Cから下位の準位46のエネルギー状態Dへの遷移が促進される。これは、半導体レーザが発振する際に、半導体にバンドギャップに相当するエネルギーを有する光を照射すると導電帯に励起された電子が照射された光に誘導されて価電子帯への遷移が促進されて半導体のバンドギャップに相当するエネルギーの光を放出する誘導放出に類似の現象である。その結果、エネルギー状態Fとは異なるエネルギー状態Dで反応を終了させることができ、従来とは異なる新規な生成物を得ることができる。

【0055】実施の形態1によれば、パルス光生成装置10は、パルス幅200fsの単一のパルス成分から成るパルス光を入射してパルス幅300fs程度の複数のパルス成分から成るパルス光を発生することができる。また、フォトニック結晶体2の寸法は100~200μmと小さいので、寸法の小さい光学系により極短パルス幅を有するパルス光を発生させることができる。

【0056】[実施の形態2] 図11は、この発明による実施の形態2を示し、この実施の形態2によるパルス光生成装置50は、図1に示すパルス光生成装置10に回転手段500を追加したものである。回転手段500

は、軸4と、回転体5と、コイル5A, 5B, 5C, 5D(図12参照)と、磁石6A, 6B, 6C, 6D(図12参照)とから成る。軸4はフォトニック結晶体2の基板22に垂直に取り付けられている。回転体5は、軸4の一方端に取り付けられている。

【0057】図12を参照して、コイル5A, 5B, 5C, 5Dは回転体5の側面に90度間隔で取り付けられており、磁石6A, 6B, 6C, 6Dは、それぞれ、コイル5A, 5B, 5C, 5Dに対向するように配置されている。また、磁石6A, 6B, 6C, 6Dは、全て同じ極性の磁石であり、例えばN極側がコイル側になるように設置される。コイル5A, 5Cに紙面裏側から表側に向かう電流を流し、コイル5B, 5Dに紙面表側から裏面側に向かう電流を流すと、コイル5A, 5Cにはローレンツ力120が作用し、コイル5B, 5Dにはローレンツ力121が作用する。そして、ローレンツ力120がローレンツ力121と釣り合った位置で回転体5の回転が停止する。コイル5A, 5Cに流す電流とコイル5B, 5Dに流す電流とを制御することにより、それぞれ、ローレンツ力120、およびローレンツ力121を制御することができ、回転体5を矢印7の方向に任意の角度だけ回転することができる。

【0058】図11は、回転体5が矢印7の方向に回転することにより軸4も矢印7の方向に回転し、軸4に固定されたフォトニック結晶体2が矢印7の方向に回転するパルス光生成装置50を示す。この図11において、光源1から出射されたパルス光PH1が、面110からフォトニック結晶体2に入射すると、すなわち、図2において層16, 17を構成する棒状のGaAsの長手方向からパルス光PH1がフォトニック結晶体2に入射すると、入射したパルス光PH1は図3のΓ-K領域またはΓ-L領域のバンドに沿ってフォトニック結晶体2を伝搬する。また、回転体5を回転させてパルス光PH1が面111からフォトニック結晶体2に入射すると、すなわち、図2において層14, 15を構成する棒状のGaAsの長手方向からパルス光PH1がフォトニック結晶体2に入射すると、入射したパルス光PH1は図3のK-X'領域のバンドに沿ってフォトニック結晶体2を伝搬する。その結果、Γ-K領域またはΓ-L領域のバンドと、K-X'領域のバンドとでは、異なるバンド構造を有するため実施の形態1において説明したのと同じ機構によりパルス幅の異なるパルス光PH3, PH4がフォトニック結晶体2から出射される。また、パルス光生成装置50を用いれば、図10で説明した反応経路を変えることによる新規物質の生成を幅広く行うことができる。

【0059】従って、実施の形態2によれば、パルス光生成装置50は、フォトニック結晶体2に入射するパルス光PH1の方向に基づいて決定されるパルス幅を有するパルス光PH3, PH4を発生させることができる。

【0060】また、フォトニック結晶体2のサイズは小さいので、任意のパルス幅を有するパルス光を小さい寸法の光学系によって実現できる。

【0061】〔実施の形態3〕図13は、この発明による実施の形態3を示し、この実施の形態3によるパルス光生成装置70は、図11に示すパルス光生成装置50に移動手段60を追加したものである。移動手段60は、ガイド61と、歯車63（図14参照）と、モータ（図示せず）とを含む。移動手段60は、フォトニック結晶体2の基板22に垂直、且つ、光源1から出射されるパルス光PH1の光軸L0に並行な平面（方向DR1と方向DR2とで形成される平面）内においてガイド61に沿って光源1を移動させるものである。

【0062】図14を参照して、ガイド61は、光源1とフォトニック結晶体2との距離Rを半径とする円周140に沿って配置されており、歯車63と噛み合う凹凸610を有する。モータが歯車63をガイド61に沿って矢印64の方向に回転させると歯車63と接続された光源1は、矢印62の方向に移動し、光源1とフォトニック結晶体2との相対位置が変化する。

【0063】移動手段60が光源1を位置P1から位置P2に移動させると、光源1から出射されたパルス光PH1は、面112からフォトニック結晶体2に入射する。位置P2は、位置P1における光源1とフォトニック結晶体2とを結ぶ線に対して45度の角度を成す線上に存在するため、移動手段60は、フォトニック結晶体2を中心として光源1を位置P1から矢印62の方向に中心角が45度になるように移動させれば、パルス光PH1が面112から45度の角度を成してフォトニック結晶体2に入射する。

【0064】パルス光PH1が45度の角度を成して面112からフォトニック結晶体2に入射することは、図2において、層14を構成する棒状のGaAsと、層15を構成する半周期ずれた棒状のGaAsとを結ぶ方向からフォトニック結晶体2に入射することに相当し、図3のX-K領域のバンドを伝搬する。従って、フォトニック結晶体2からは実施の形態1、2におけるパルス光PH2、3、4とは異なるパルス幅を有するパルス光PH5が出射される。この場合、光源1からのパルス光PH1がフォトニック結晶体2に入射する方向が変わっても、パルス光PH5が対象物3の方向へ出射されるようにできる。

【0065】位置P3は位置P2に対して対称の位置であるため、光源1を位置P3に移動させることは、光源1を位置P2に移動させることと同じである。

【0066】移動手段60は、上述した距離（角度）に限らず、任意の距離（角度）だけ光源1を移動させることができる。また、移動手段60により光源1を回転させつつ回転手段500によりフォトニック結晶体2を回転させれば、面110、111に入射するパルス光PH

1の角度も変化させることができる。その結果、さらに異なったバンドに沿ってパルス光PH1を伝搬させることができ、パルス光生成装置70は、異なったパルス幅を有する多くのパルス光を発生させることができる。

【0067】また、パルス光生成装置70を用いれば、図10で説明した反応経路を変えることによる新規物質の生成をさらに幅広く行うことができる。

【0068】移動手段60の代わりに、フォトニック結晶体2を方向DR1と方向DR2とで構成される平面内で回転させる回転手段を用いても、パルス光生成装置70を作製することができる。

【0069】実施の形態3によれば、フォトニック結晶体2を回転させる平面（方向DR2と方向DR3とにより形成される平面）と垂直な平面内で光源1を移動させることによりフォトニック結晶体2に入射するパルス光PH1の方向をさらに変化させることができ、パルス光生成装置70は、パルス幅の異なるパルス光を発生させることができる。

【0070】実施の形態1、2、3においては、GaAsと空気の領域とから構成されるフォトニック結晶体について説明したが、本発明は、これに限らず、GaAsと空気以外の物質から構成されるフォトニック結晶体を用いてもパルス光生成装置10、50、70を作製できる。GaAsと空気以外の物質からフォトニック結晶体を構成する例としては、シリコン（Si）と二酸化珪素（SiO₂）とから構成したフォトニック結晶体が考えられる。Siの屈折率は3.3、SiO₂の屈折率は1.5であり、SiとSiO₂との屈折率比は2.2と、フォトニック結晶体においてフォトニックバンドが開くに十分な屈折率比2.0より大きいので、SiとSiO₂とから構成したフォトニック結晶体のフォトニックバンドにおいてフォトニックバンドギャップは十分に開く。SiとSiO₂とから成るフォトニック結晶体は、結晶成長させたSi基板中に酸素をイオン注入等により導入してSiを部分的に酸化させることにより2次元または3次元的に作製することができる。

【0071】また、GaAsの代わりに金属、有機ポリマー、およびエルビウム、鉄等の希土類金属を導入したガラスまたはプラスチックを用いてもフォトニック結晶体を作製することができる。

【0072】実施の形態1、2、3においては、1つの波長を有するパルス光PH1からパルス光PH2、3、4、5を生成する場合について説明したが、本発明は、フォトニック結晶体2に入射するパルス光PH1の波長を変えることによってパルス幅の異なるパルス光を発生させることも含む。パルス光PH1の波長を変える1つの方法は、光源1を構成するチタン・サファイアレーザは波長600～1100nmの範囲の光を出射するので、レーザ発振の条件を変えることによりチタン・サファイアレーザから出射されるレーザの波長を変えること

である。これにより波長の異なるパルス光PH1をフォトニック結晶体2に入射させることができる。フォトニック結晶体2に入射するパルス光PH1の波長が変われば、フォトニック結晶体2への入射光のエネルギーが変わり、フォトニック結晶体2中を伝搬するバンドが異なる。その結果、上述した機構によりパルス幅の異なるパルス光がフォトニック結晶体2から出射される。

【0073】今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した説明ではなくて特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

【0074】

【発明の効果】本発明によるパルス光生成装置は、短パルス幅を有する単一のパルス成分から成る第1のパルス光を出射する光源と、光導管から出射された第1のパルス光を入射し、複数のパルス成分から成る第2のパルス光を出射するフォトニック結晶体とを含み、第1のパルス光は、フォトニック結晶体のフォトニックバンドの上位バンドにエネルギー分布を有し、第2のパルス光は、第1のパルス光の波長、もしくは第1のパルス光がフォトニック結晶体に入射する方向に基づいて決定されるパルス幅を有するので、単一のパルス成分を有するパルス光から所望のパルス幅を有するパルス光を生成することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の実施の形態1によるパルス光生成装置の斜視図である。

【図2】 フォトニック結晶体の斜視図である。

【図3】 フォトニック結晶体のフォトニックバンド図である。

【図4】 フォトニック結晶体におけるパルス透過のFDTD計算の計算結果である

【図5】 フォトニック結晶体におけるパルス透過の実験を行う光学系を示す構成図である

【図6】 フォトニック結晶体におけるパルス透過のFDTD計算の計算結果と実験結果である。

【図7】 フォトニック結晶体の作製方法を示す工程図である。

【図8】 フォトニック結晶体の作製方法を示す工程図である。

【図9】 フォトニック結晶体における各層の位置合わせを説明するための斜視図である。

【図10】 エネルギー状態図である。

【図11】 本発明の実施の形態2によるパルス光生成装置の斜視図である。

【図12】 図11の回転手段を説明するための平面図である。

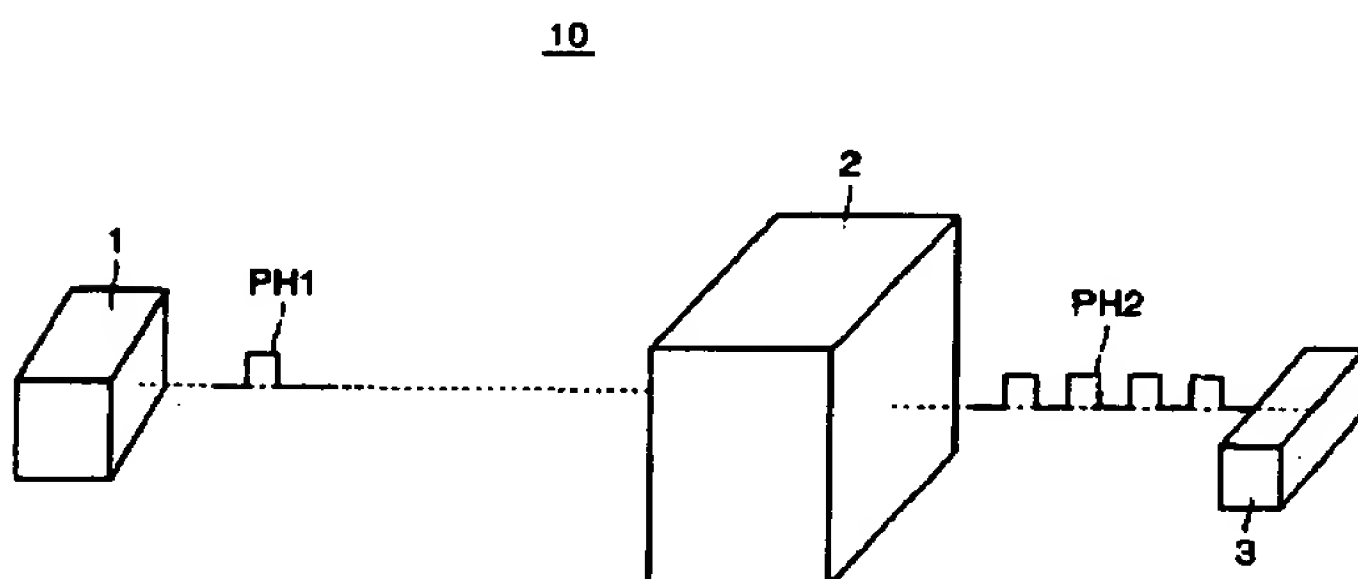
【図13】 本発明の実施の形態3によるパルス光生成装置の斜視図である。

【図14】 図13の移動手段を説明するための平面図である。

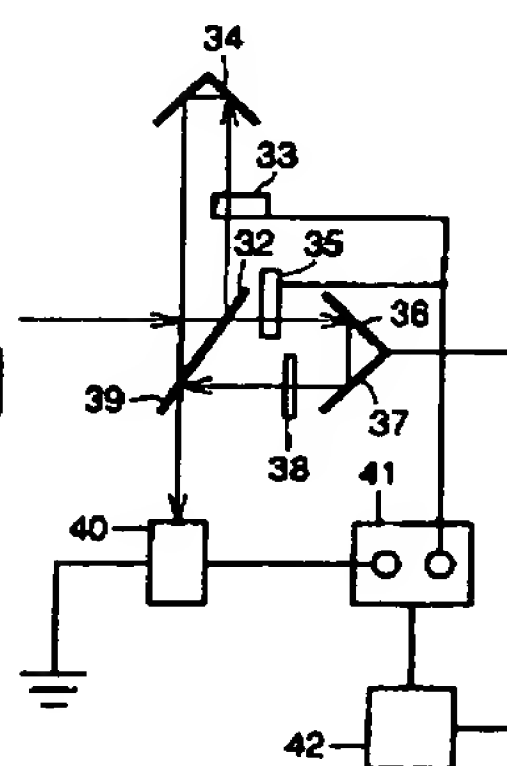
【符号の説明】

1 光源、2 フォトニック結晶体、3 対象物、4 軸、5 回転体、5A, 5B, 5C, 5D コイル、6A, 6B, 6C, 6D 磁石、7 矢印、10, 50, 70 パルス光生成装置、14, 15, 16, 17 層、20X, 20Y, 20Z GaAs、21X, 21Y, 21Z 空気、22 基板、23 第1層、24 第2層、25 第3層、26 第4層、27, 28, 31 フォトニックバンド、29 エネルギー分布帯、30 領域、32 ビームスプリッタ、33, 35 チョップ、34, 36, 37 反射ミラー、38 フォトニック結晶、39 Mach-Zehnder干渉計、40 HgCdTe検出器、41 ロックインアンプ、42 コンピュータ、43 GaAs膜、44 矢印、45 棒状GaAs、46, 47 準位、60 移動手段、61 ガイド、62, 64 矢印、63 歯車、110, 111, 112 面、120, 121 ローレンツ力、140 円周、500 回転手段、610 凹凸。

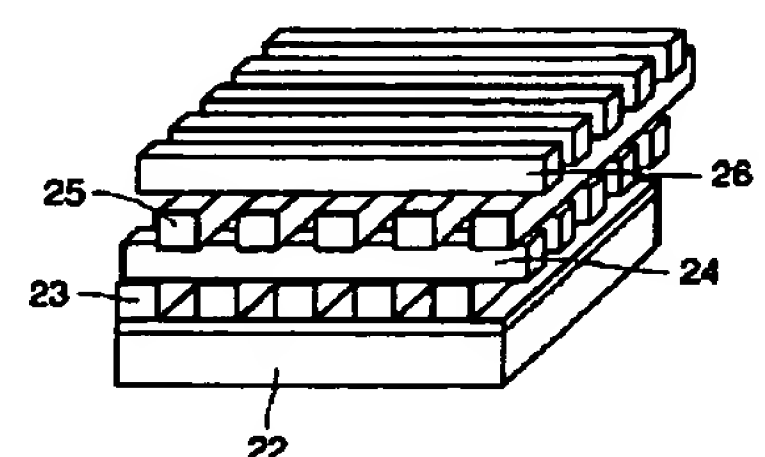
【図1】



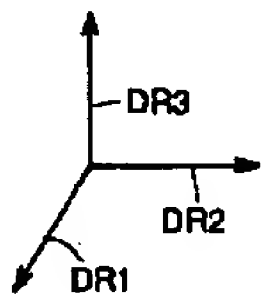
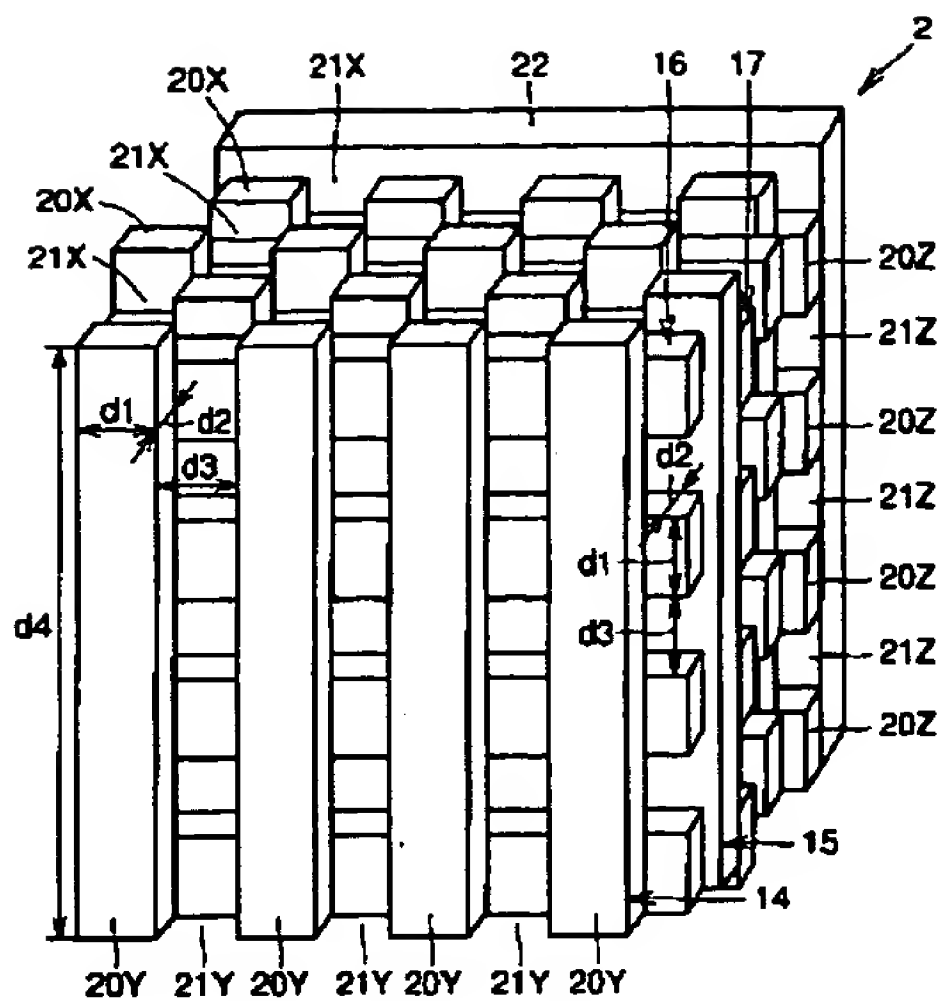
【図5】



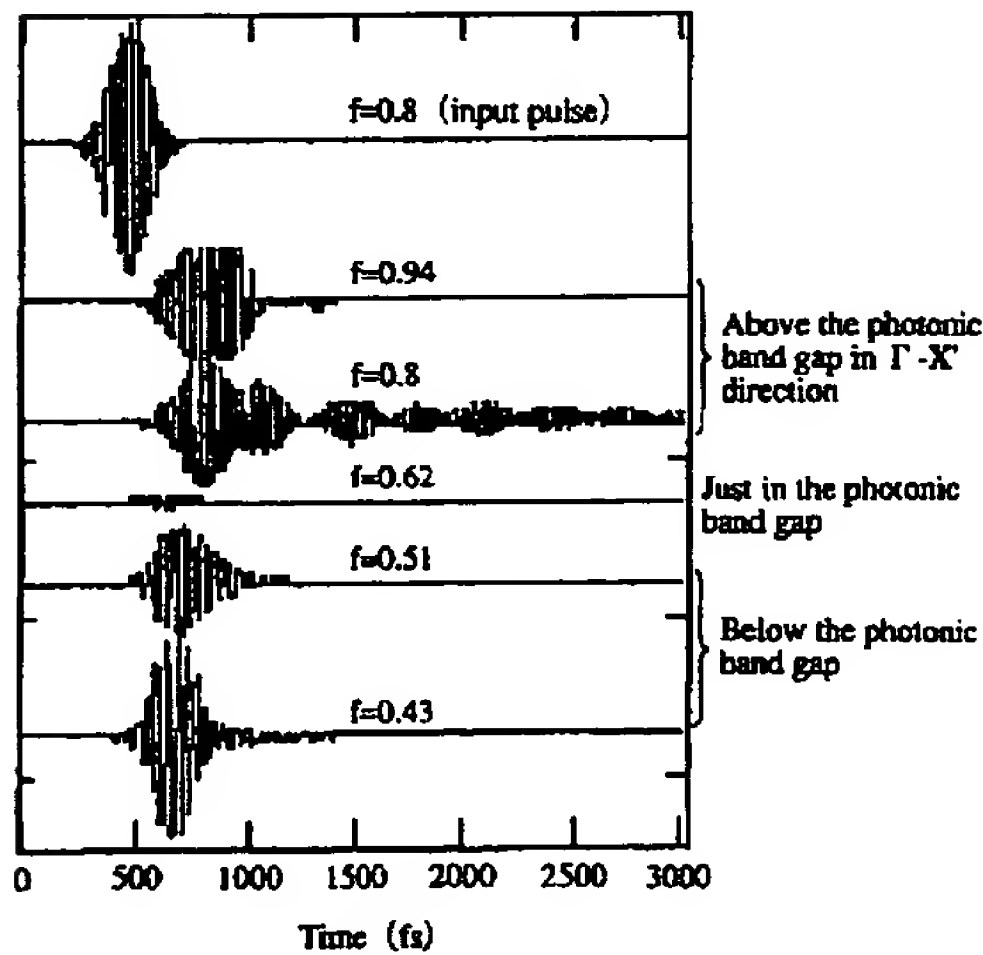
【図9】



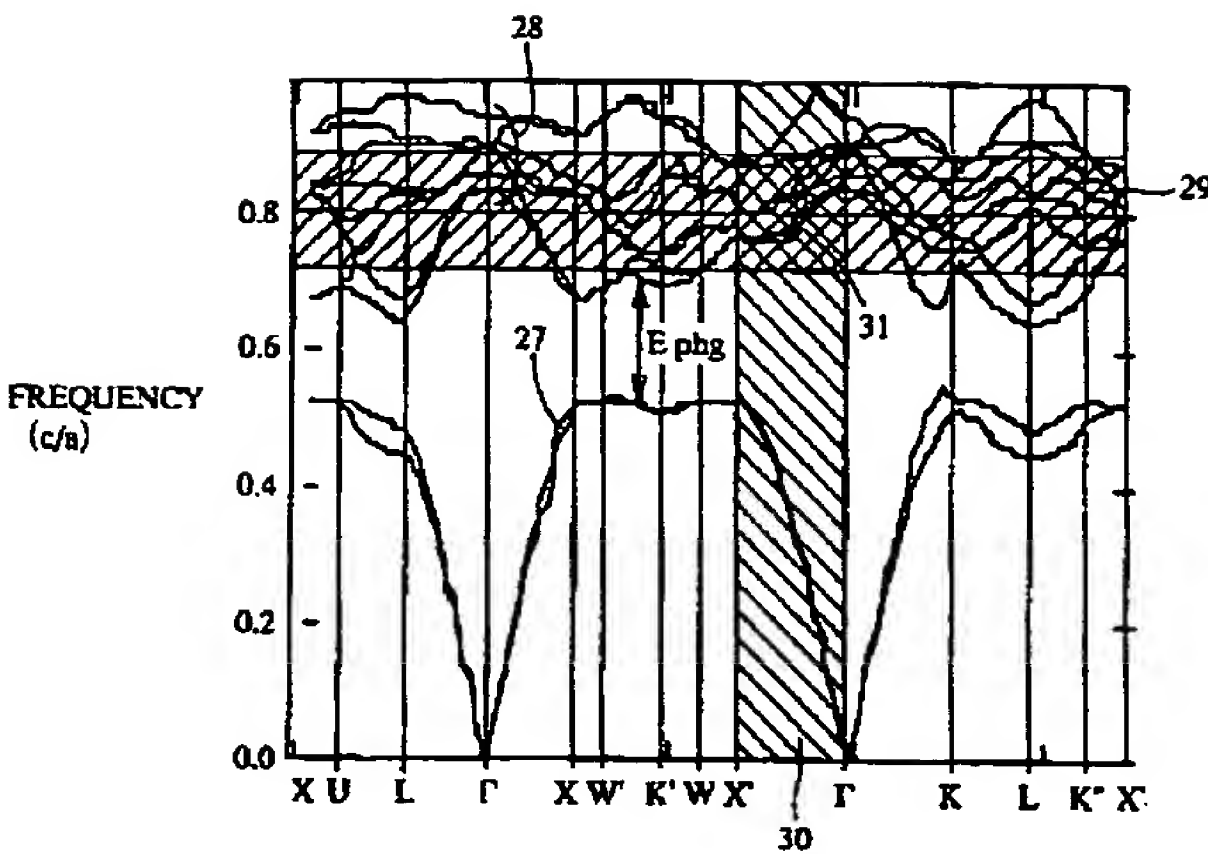
【図2】



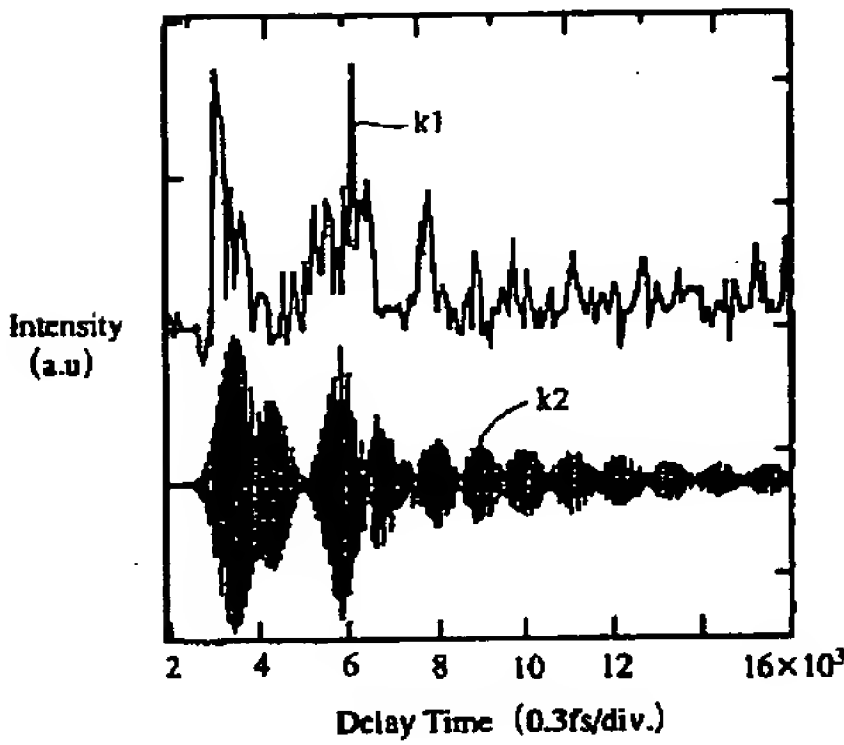
【図4】



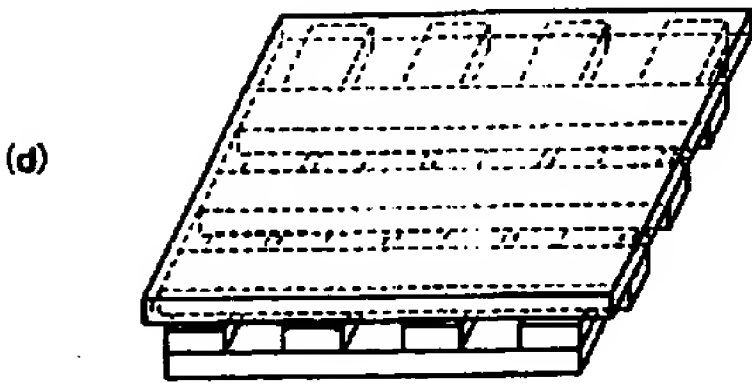
【図3】



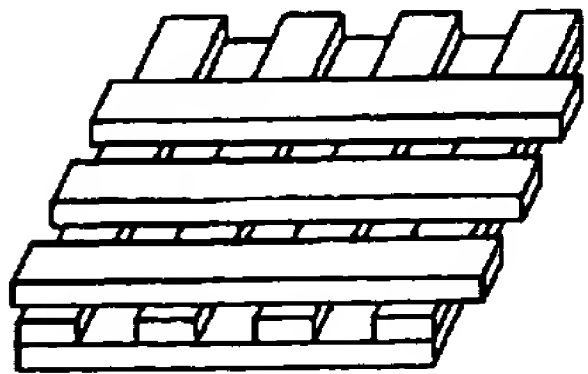
【図6】



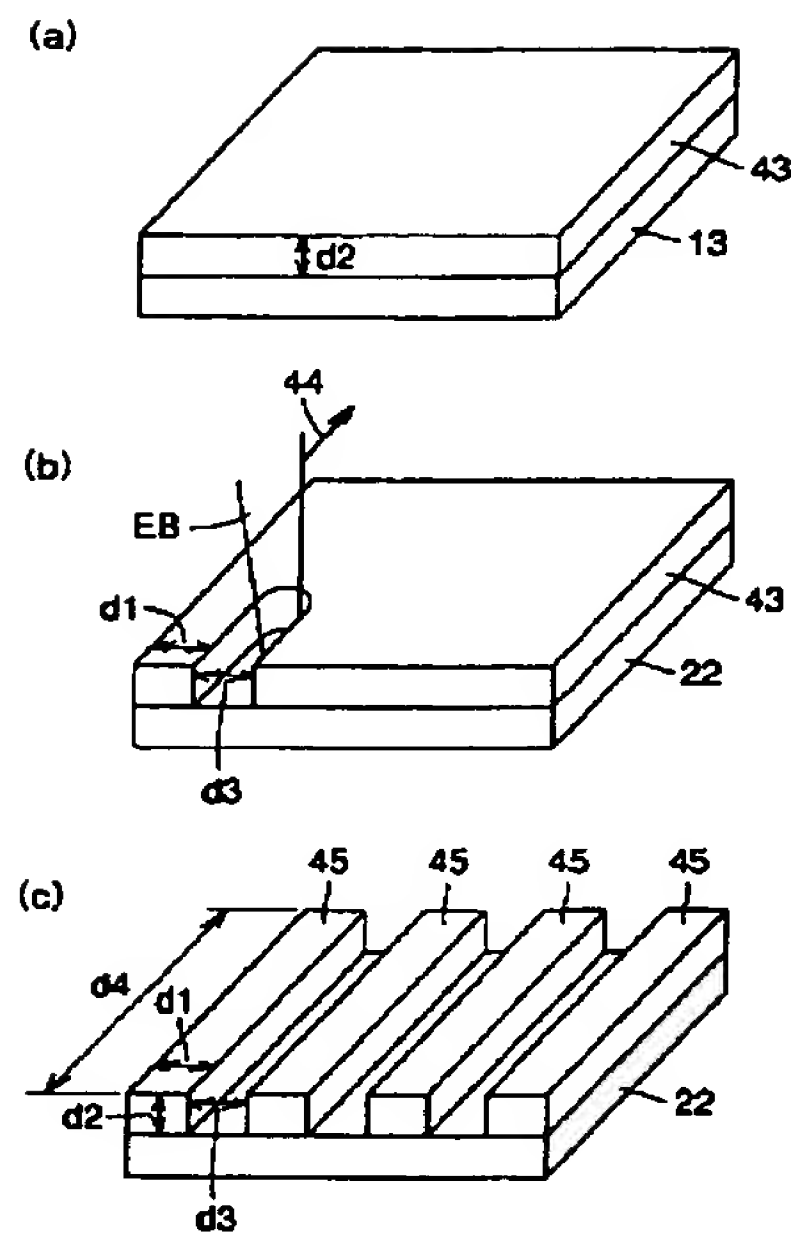
【図8】



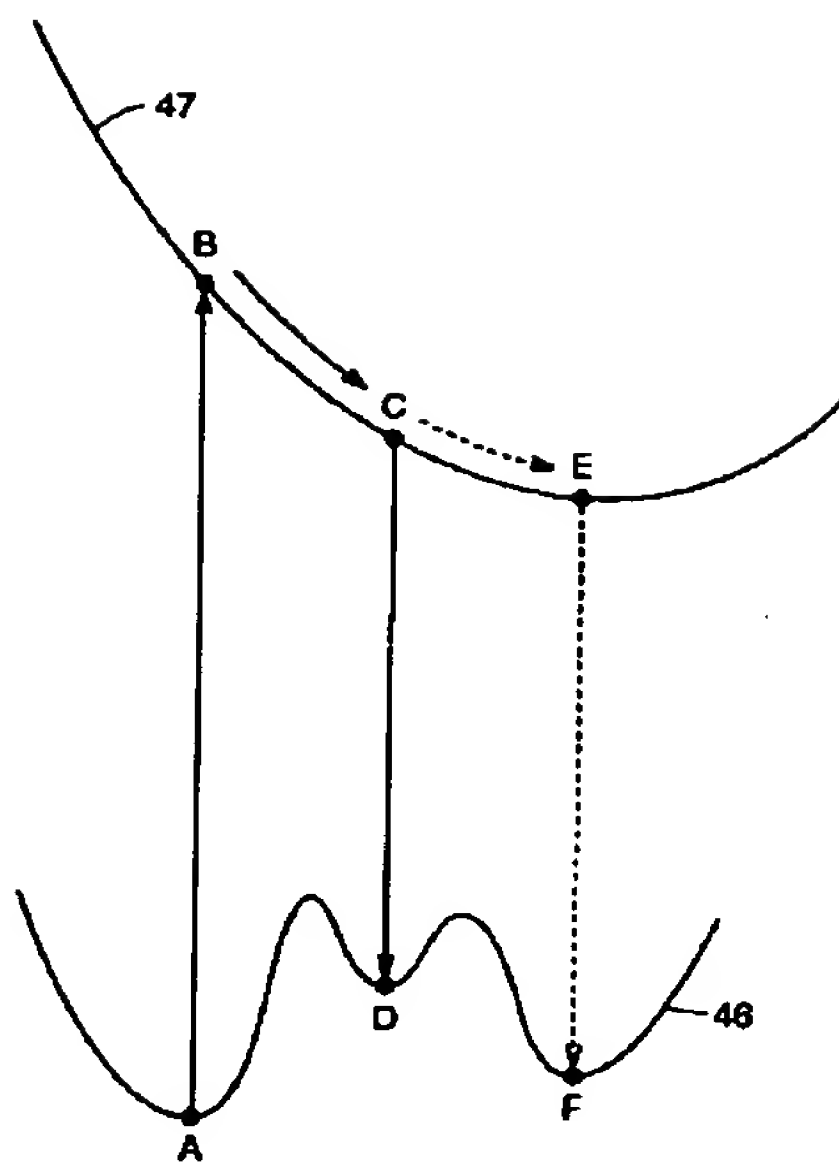
(a)



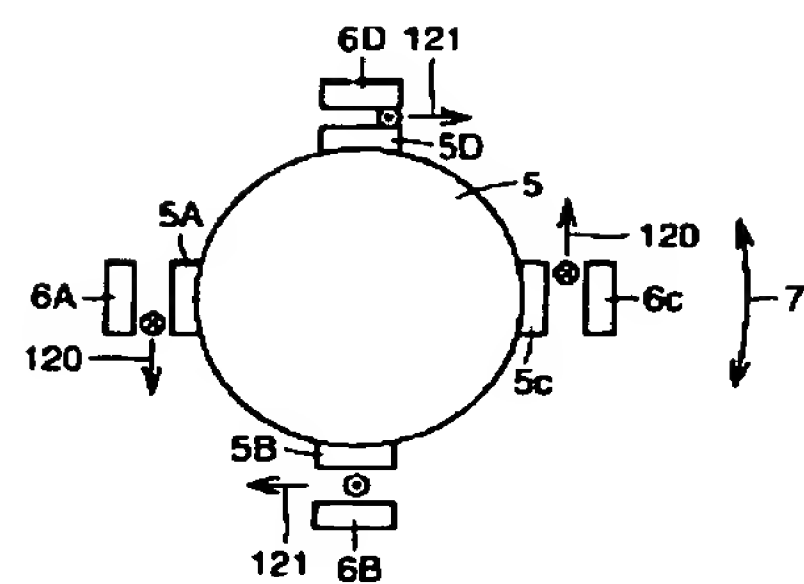
【図 7】



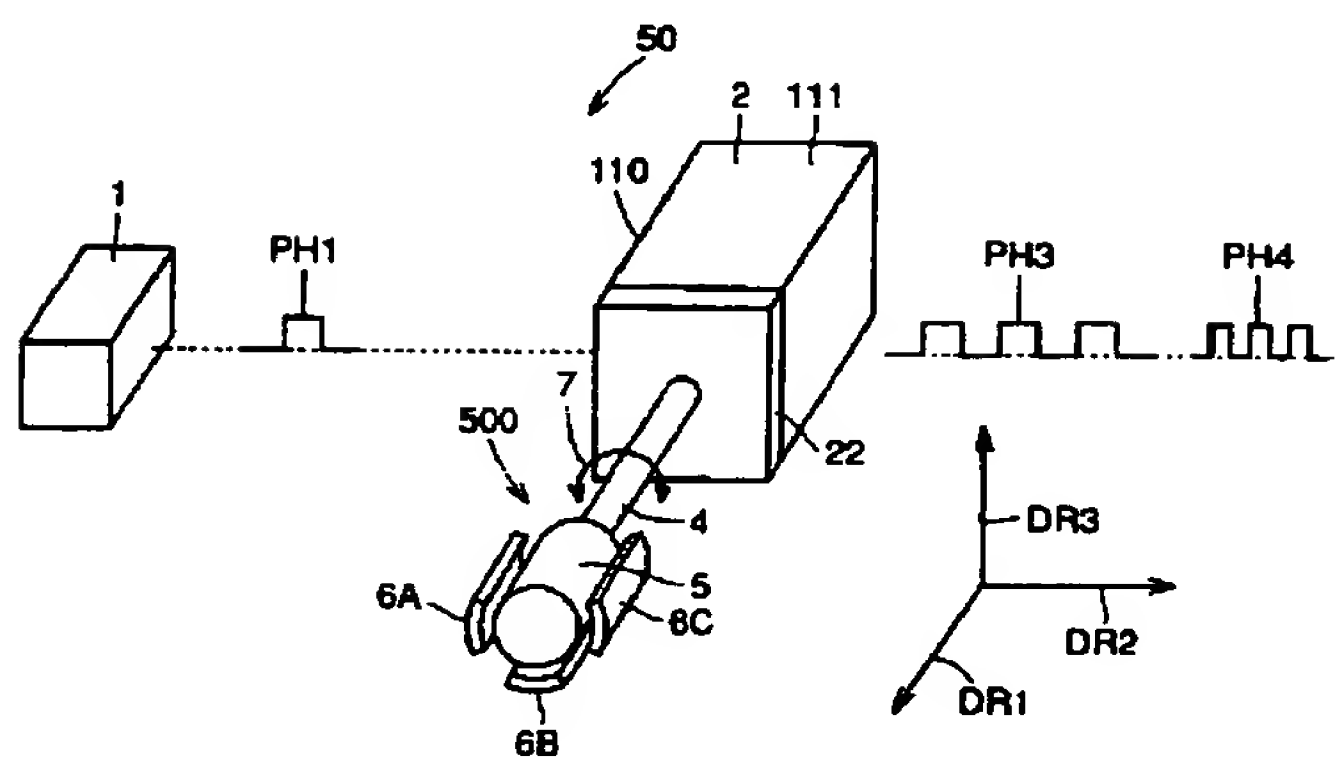
【図 10】



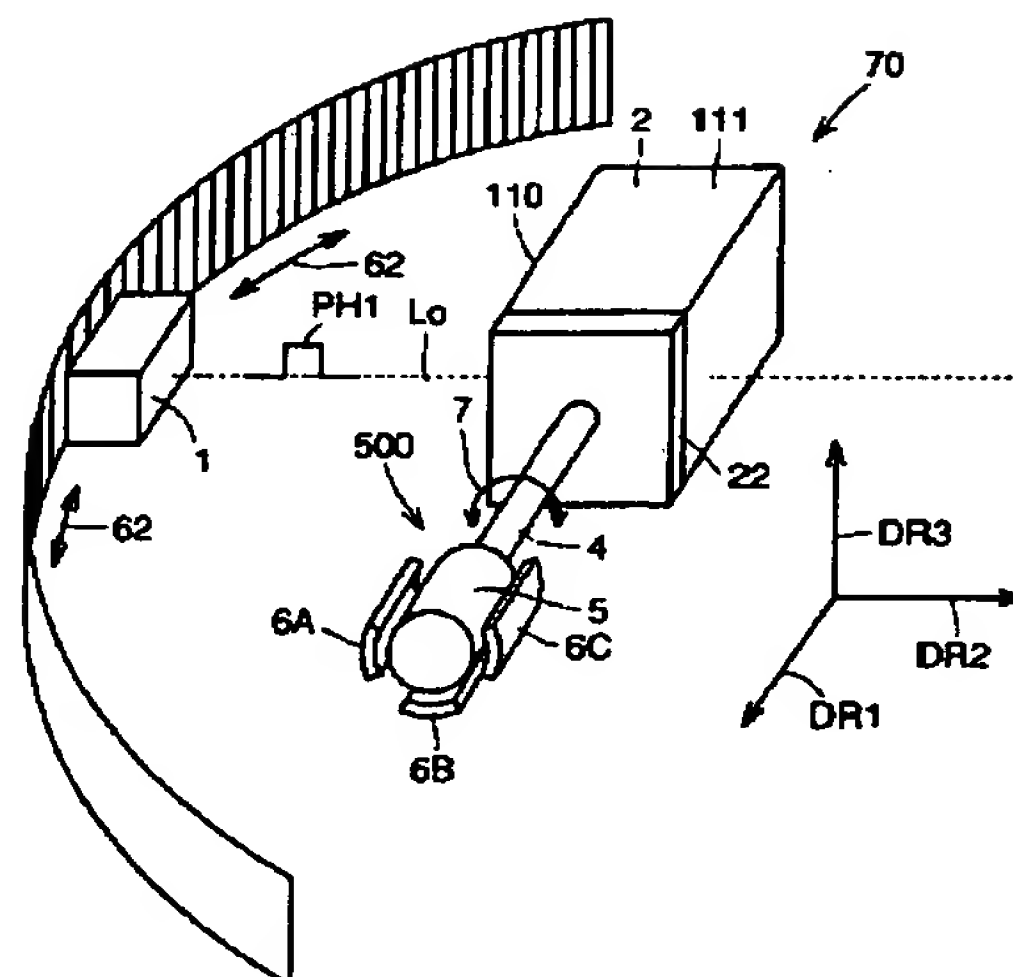
【図 12】



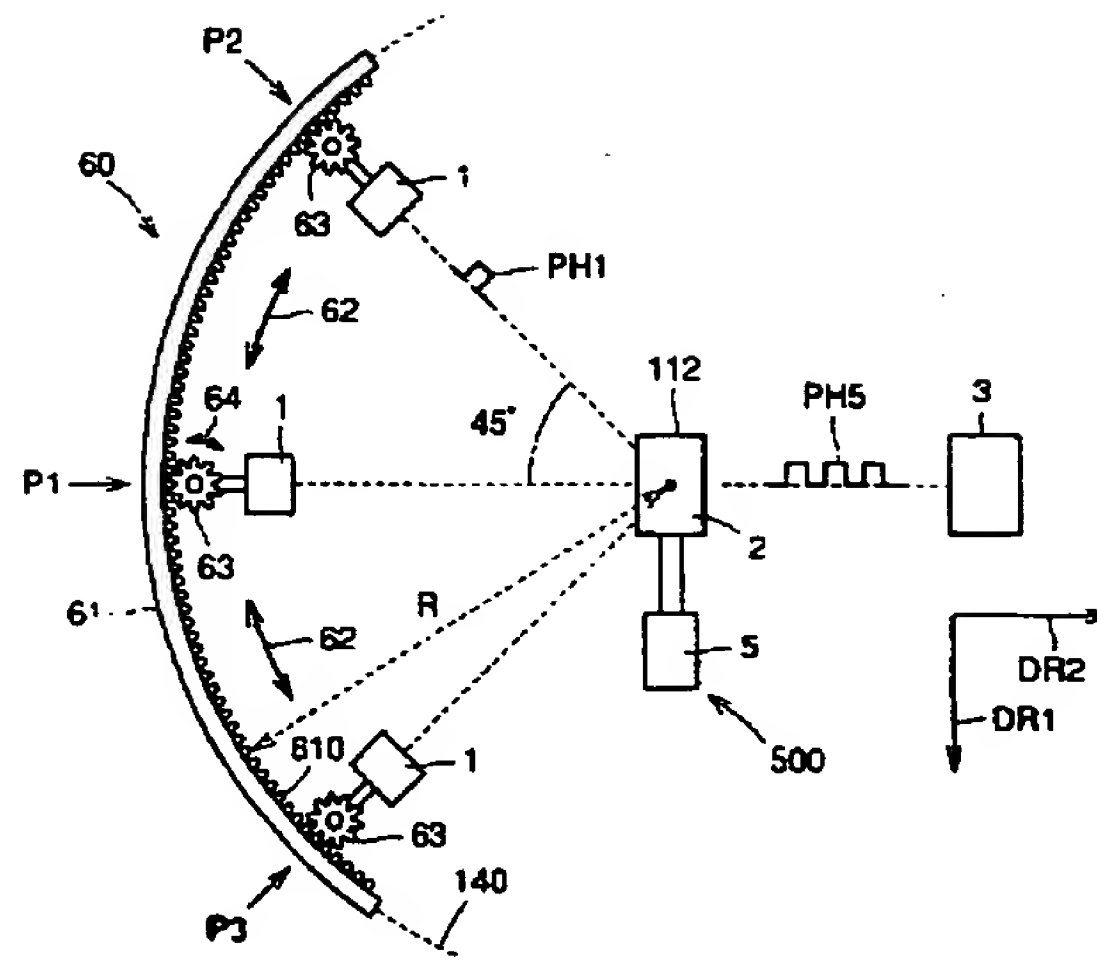
【図 11】



【図 13】



【☒14】



フロントページの続き

(51) Int. Cl.⁷
H 0 1 S 3/10

34429

F I
G O 2 B 6/12

テ-マコード (参考)

$$\begin{matrix} Z \\ N \end{matrix}$$

(72)発明者 野田 進
京都市左京区山田本町 京都大学 工学研
究科内

(72)発明者 チュティナン アロンカーン
京都市左京区山田本町 京都大学 工学研
究科内

(72)発明者 浅野 卓
京都市左京区山田本町 京都大学 工学研
究科内

(72)発明者 山本 宗継
京都市左京区吉田本町 京都大学 工学研
究科内

F ターム(参考) 2G065 AB02 AB14 BA02 BB37 BC04
DA05
2H041 AA21 AB14 AC04 AZ05 AZ08
2H047 KA03 QA02 RA00
5F072 AB20 FF09 KK30 QQ03 RR01
SS08